

なかむらしゅうじ

中村修二

(元株式会社日亜化学研究員、現・カリフォルニア大学サンタバーバラ校教授)

青色発光ダイオード・半導体レーザーの実用化



20 世紀中の開発は困難といわれた青色発光デバイスの開発に挑戦した。多くの研究者が断念した素材の窒化ガリウムをあえて選択し、ツーフロー方式という新規な窒化ガリウム製膜法を発明し、均一で高品質な半導体薄膜を得ることに成功。青色発光ダイオードおよび青色半導体レーザーを世界で初めて開発し、新事業を創出した。

生い立ち

中村修二は 1954 年 5 月愛媛県の西部の小さな村 (現西宇和郡瀬戸町大久) で生まれ、大洲市の中学、高校に進んだ。大学進学には徳島大学の工学部を選んだ。理由は数学、物理が好きで、得意でもあったことで、本当は理学部の物理学科に進学したいと思っていたが、卒業後の就職を考えると理学部の物理では難しいとの周囲の意向を配慮したためであった。そして 1973 年徳島大学工学部電子工学科に入学した。

徳島大学に入ったけれども、1,2 年生の教養課程はいろんな科目を必須科目として取らざるを得なかったため、興味が湧かなかった。大学に入れば好きな数学や物理学に没頭できると思っていたが、現実にはそのようにはならず大学生活に完全に失望することとなる。

大学3年になり電子工学の専門の講義を履修することになり、その中の福井満寿夫助教授の電子物性工学を受講することとなり、すべての材料の物理的な特性を、電子物性理論により説明しうることを教えてもらい、これは自分の好きな物理そのものであると理解し、この分野に進んで研究したいという強い充足感を覚えた。

そして福井助教授の所属する多田修教授の材料物性講座に入り、材料の研究を始めた。そして学部卒業の時点で、もっと研究を続けたいという気持ちが強く、二年間の修士課程に

進むことになる。多田教授の研究室の下で、実験に必要な装置は出来るだけ手作りで行うように徹底的に指導を受けた。これは研究費を効率的に使うということもあったが、市販の装置を買って実験を行い、市販の装置でありきたりの測定を行っても、新しい発見は殆ど何も得られないというのが、多田教授の教えであった。当初中村は物性理論に興味を持っており、実験をやるにしても、電気溶接をしたり、旋盤を使っての部品の製作などやることにはなつたけれども、こんなことまでやらなくてはならないのかという気持ちが強かった。しかし気持ちとは別に中村の体の方は、このような作業を順次こなしてゆくことになり、後年この体験が貴重なものとなる。

大学時代、中村は私生活で新しい変化が起きる。同じ大学の女性と知り合いになり、大学院1年生であった、1978年に結婚し、修士課程を終えた時には子供が生まれていた。

修士課程修了後は大手企業に就職したいと思っていたが、子供を育てる環境などで都会に出てゆくことに逡巡があった。中村は研究室の多田教授に相談したところ、地元の企業へ就職することを勧め、多田教授の知り合いが社長をしている、日亜化学工業を紹介してくれ、中村はその勧めに従うことが、家族および自分が幸せになれる道であると考え、徳島にとどまって就職することを決意した。

日亜化学に就職

かくして1979年4月、中村は徳島市の南方にある阿南市の日亜化学工業株式会社に入社した。日亜化学工業は当事社長の小川信雄氏が1956年に創業した会社で、従業員が180名位で、年間の売り上げが20-30億円で、テレビのブラウン管に用いられている蛍光体材料の国内トップメーカーであった。入社して配属された部署は開発課で課長を含め総勢四名の小さいグループであった。この時期、日亜化学では化学会社として、原材料分野に参入するかどうか検討中であった。そのさなかに、光半導体の材料となるガリウムリン多結晶がビジネスとして有望であるとの営業の情報により、開発課はテーマとして取り上げることとなり、中村がその開発担当者に命じられた。中村は日亜化学に入社した際、この会社では材料物性に関係のある開発は出来ないだろうと考えていたが、このガリウムリン結晶の開発は、大学で研究していたものとの関係があり、何よりも物理、化学をはじめ半導体物性などの学問を総合しなければならぬものであり、願ってもないテーマであると感じた。「会社に入ったら仕事を捨てたと思え」と多田教授に言われていた中村にとってこのテーマは「超ラッキー」とおもわせるものであった。ところが、いざガリウムリン結晶の製作を始めるとなると、これまで何の経験も無く、一部不安であったが、やってみようという気持ちが大きかった。開発をスタートするといっても、中村はガリウムリン結晶をどのようにして作ればよいのかということから調査しなければならなかった。そのため最初の数ヶ月は文献や資料を調べるのに時間を費やした。その結果、ガ

リウムとリンのそれぞれの素材を真空中で高温にし、原子を互いに反応させることにより、少し温度の低い部分にガリウムリン結晶が析出してくることがわかり、そのためには水平ブリッジマン法という装置を製作する必要があることがわかった。この装置一式を購入する予算は得られなかったため、そのために必要な装置は殆ど手作りで作らざるを得なかった。そのために耐熱煉瓦の組み立てや加熱ヒータを巻くなどして、電気炉を製作した。次にガリウムリンを反応させる反応管であるが、ガリウムとリンを反応させるには摂氏 1000 度にしなればならず、そのためにガラスではなく石英管を用いる必要があった。両側が開いた石英管を購入し、酸水素バーナーを用いて、石英管の一方を溶接して封じる。その後で開いている石英管の側から、奥にリン、手前にガリウムを離して挿入する。そうしておいて、その石英管の内部の空気を、真空ポンプで引きながら、開いている側を、酸水素バーナーで真空封じを行う、という手順で結晶作成のための準備が出来ることとなる。この石英管容器を電気炉の中に挿入し、ガリウムをおいてある部分を約 1000 度、リンをおいてある部分を約 600 度に加熱する。そうするとリンが気化し、石英管内部は5気圧以上の高圧となる。この気化したリンが 1000 度に加熱されたガリウムと反応して、ガリウムリン結晶となって、石英管内に析出する。この反応を一定時間行った後、電気炉の温度を徐々に下げ、その後封じてある石英管をダイヤモンドカッターで切断することにより、ガリウムリン多結晶が得られることとなる。このガリウムリン結晶製作において、リンを高温に加熱する必要があり、そのため石英管の内部は高圧になる。封じ込めた石英管に一部でもクラックがあると、ガリウムリンの反応中に石英管が大きな音を伴って破裂することがたびたび起こった。このような労力と根気のいる作業を延々と続けた結果、石英ガラス加工技術に至っては神業と自他共にゆるすレベルになっていたが、研究を始めて3年後の1982年頃、きらきら光る宝石のような、黄緑色のガリウムリン結晶の製作に成功した。

中村は出来上がったガリウムリン結晶を開発、製造しただけではなく、品質管理をきちんと行い営業販売にまで出かけた。当時の日亜化学では半導体の分かる営業がいなかったためである。値段を値切られながら、兎に角ある量販売することができたが、月100万円くらいしか売れず、売り上げに大きく貢献するといったものではなかった。

次に中村が開発することとなったものは、ガリウムリンと同じ化合物半導体材料であるガリウム砒素結晶であった。ガリウム砒素はバンドギャップが 1.43eV で、発光素子にすると赤外発光し、色々なリモートコントロールに利用されていた。またガリウムアルミニウム砒素赤色発光ダイオード成長用の基板にも使用されていた。製作方法はガリウムリンと同じ水平ブリッジマン法であるが、試料を加熱する温度を 1200 度まで上げる必要があり、そのための改良も手作りで行った。原料となるガリウムと砒素を石英管に真空封入し、電気炉に入れ、温度を 1200 度まで上げる。その後温度を徐々に下げていくなかでガリウム砒素を析出させるわけであるが、この実験中にたびたび石英管が破裂するトラブルに見舞われた。この原因はいろいろあるが

一つには砒素は加熱すると、固体から昇華により気化する性質があり、さらに温度を上げるとある条件で液化するという複雑な性質を有しており、高温の石英管の内部の反応部分にガリウムと砒素の原子数が一対一に反応できるような状態になっておるときは理想的であるが、砒素の濃度が高すぎると、固化したガリウム砒素結晶の内部圧力が高まり、破裂、爆発することが、何度も失敗しているうちにわかってきた。最終的には開発に着手して3年で、それぞれの原料加熱温度の制御がきわめて重要であり、さらに装置固有の性質を加味して、製作条件を設定することにより爆発させることなく、安定して、ガリウム砒素結晶を製作することに成功した。これも中村自ら営業に出かけ、それなりには売れたけれども、限られた売上高であった。

上記二つの開発に成功した後、1985年頃、中村に次の開発要請がきた。今度は赤外発光素子に使われるエピタキシャルウェハ(エピウェハ)そのものの開発で、ガリウムアルミニウム砒素エピウェハの製作であった。このエピウェハ開発には、新規に液相エピタキシャル法という結晶成長装置が必要になった。またこの開発はこれまでの化合物半導体の素材を製作するのではなく、発光素子に使用するためのエピウェハそのものを製作するもので、単に結晶の純度をよくするだけでは駄目で、半導体デバイスとしての必要な性能を満足する必要があった。

まず液相エピタキシャル結晶成長装置であるが、当時市販の装置はあったが、高価でしかも納期が一年近くかかった。そこで中村は、この装置を自力で作ることになり、外部に注文する納期の半分の期間で作り上げた。この自作の液相エピタキシャル結晶成長装置を用いて、発光素子用エピウェハを製作するわけであるが、その手順は土台の基盤となる材料としてガリウム砒素基板を反応装置内に配置し、そして結晶成長の原料となるガリウム・アルミニウム・砒素からなる化合物を加熱溶解させ、その溶解液を基板に接触させる。通常発光素子を得るにはpn接合からなる積層膜を形成する必要があり、そのために二種類の溶解液の接触を順次行うことにより、積層膜からなる発光素子用エピウェハが製作されることになる。このエピウェハは、加熱する温度の設定、溶解液の組成、溶解液を接触させる時間など多くの製作条件があり、その中から最適の製作条件を見つけていく、根気の要る作業の積み重ねが必要であったが、その条件を詰めていった。そして出来上がったエピウェハの品質評価を行うためには、通常ホール測定器が必要であったが、中村はこれも自作で作り上げた。このホール測定器で測定することによって、出来上がったエピウェハ内部の電子の動きやすさの目安である、ホール移動度が測定でき、その値がある基準値を超えていると合格になるものであった。ところがホール測定で基準値を超えたエピウェハを出荷しても、納入先から発光素子を作ってみたが、発光性能が悪いというクレームが出てきた。そのため中村は最終的に発光素子を製作して、エピウェハを評価しないと駄目だと結論に達し、当時のトップの小川社長に直談判して、発光素子を製作するための装置と評価装置を購入し、エピウェハの実質的な評価のでき

る体制をつくった。開発から4年後の1988年、良好なエピウェハを出荷できるようになった。

日亜化学での転機

中村は日亜化学に入社後10年間で化合物半導体3品種の商品化に成功した。しかも殆ど一人、独力で行ったことは驚くべきことであった。しかしながら、これらの商品は売り上げの貢献という点ではわずかであり、その点では成功といえる物ではなかった。そのことは中村自身十分に認識しており、従ってこれからの開発テーマの選定において、会社の営業サイドからの要請にのみ依存することの限界を強く意識した。これまでの開発商品を振り返ると、いずれも競合他社があり、半導体材料では新参の日亜化学が、同等の性能の商品を提供しても、採用される確率は極めて低いことを、身をもって知る事となった。とすれば他社がやっていないものを手がけるしかないと思われ、中村は考えるに至った。他方10年間発光デバイスに関連した開発に携わっていたため、この分野の技術に非常に詳しくなっていた。

中村はそれまでの中で青色発光デバイスをやってみたいと思っていた。上司に何回も言ったが、上司は、「うちみたいな田舎の会社で、金もない、人もない、知識もない、何もなくてそんなもんでできるわけないだろ」といわれた。しかし10年経過して、このままではどうにもならないと感じていた。それで最終的にテーマが認められなかったら辞めても良いと考え、青色発光デバイスをやろうと決めた。

1988年、中村は直属の上司に相談に行っても認めてもらえないと考え、社長室に出向き、小川社長に直接面談し、青色発光ダイオードの開発をやりたいのですがと、単刀直入にお願いした。すると意外にも小川社長は「いいよ」と簡単にOKがでた。その後社長のところに何度か出掛け、青色発光ダイオードの説明を行い、最終的に開発予算3億円の許可を得た。この開発費の額は日亜化学の年間売上高が200億円に満たない当時において考えられない巨額のものであった。

当時の青色発光ダイオードの開発状況は次のような状況にあった。青色発光半導体デバイス用材料としてはバンドギャップの大きさから、炭化硅素(SiC)、セレン化亜鉛(ZnSe)、そして窒化ガリウム(GaN)の三種類が考えられていた。その中で炭化シリコンは間接遷移型の半導体であり、発光デバイスとしては不適であると考えられた。セレン化亜鉛が青色発光デバイスに適していると考えられ、1970年代から多くの研究者が開発に取り組んだ。発光ダイオード、半導体レーザのいずれも実験室レベルでの試作に成功したが、電極部分の金属が発光部分に拡散する問題点などを解決することができず寿命が短いため、製品化できなかった。1970年代から窒化ガリウムがもう一つの材料として、研究されていた。しかしながら、格子定数が16%違うサファイア基板を使わざるを得ず、良質な窒化ガリウム薄膜を得ることができなかった。また不均一ながらn型薄膜は得られたとしても、p型伝導自体が実現できなかった。こ

のような状況で窒化ガリウム研究者の多くは、窒化ガリウムを使った発光デバイスの実現は困難であると判断し、研究を断念していったのである。

中村は素材としてセレン化亜鉛または窒化ガリウムのどちらかを選ぶことになると考えた。それと同時に、それらの製作方法として二つの方法があり、いずれを採用すべきかという問題があった。一つは分子線エピタキシャル法(MBE)で、もう一つは有機金属化学気相成長法(MOCVD)とよばれる方法であった。中村は MBE 法は分子を一個ずつ成長させていく方式であり、研究用途としては有効な製作方法であるが、大量生産には向かないと考え、この方法を採用しないこととした。もう一つの MOCVD 法はガス状にした有機金属化合物を加熱した基板上に導き、化学気相反応によって、基板に目的とする薄膜を成長させる方法であり、量産性があり、迷わずこの方法を選んだ。

薄膜製作方法として MOCVD を選んだ中村であったが、今度はこれまでのようにその装置を自分で製作するというわけには行かなかった。それは当時 MOCVD という薄膜製作方法はその方法自体が研究の最先端にあり、その製作する材料によって、一から試行錯誤の繰り返しを行いながら作り上げていくという状況であった。このような状況にあったので、中村はこの分野で最も進んでいる外国の大学の研究室に短期留学するのが最も良い方法であると考え、MOCVD 技術の評価の高い米国フロリダ州立大学の工学部に客員研究員として 1988 年 4 月から一年間の予定で出かけることとなった。

留学した研究室には 2 台の MOCVD が稼動していたが、研究室のメンバーが取り合いの状況で、新入りの中村が使える状況ではなかった。結局、部品がバラバラに分解されていて、使い物にならない装置があり、それを組み上げて使わざるを得ないということであった。内心では、折角留学で米国まで来たのだから MOCVD の実験をどんどんやりたいという気持ちが強く、装置の組み上げをやらねばいけないということで強い失望感に襲われた。しかし現実には地道に装置の組み上げを行わざるをえなく、実際に使えるようになるまでに 9 ヶ月と、留学期間の大半を使ってしまうこととなった。後にこの経験が役に立つことになるのだが、兎に角 MOCVD 装置を完成させることができた。そして残りの 3 ヶ月でガリウムリンやガリウム砒素の薄膜製作を行ってみると、きちんとした結晶薄膜が成長しており、MOCVD 装置として十分な性能を持っていることを確認した。

この留学期間に中村が決断しなければならないことがあった。それは青色発光素子を開発するに当たって、どの材料に決めるかということ、すなわちセレン化亜鉛か窒化ガリウムかどちらにするかという重要な問題であった。当時学会での研究発表はセレン化亜鉛に関するものが圧倒的に多く、窒化ガリウムの研究はわずかであった。中村は多くの研究者が研究しているセレン化亜鉛の場合は、製品化に成功しても技術発明が分散することになり、独占的な技術の確保が困難であると考えた。窒化ガリウムに付随する技術的な問題は、従来の考えに固

執にしないことにより必ず解決できるという確信に支えられ、あえて少数派の窒化ガリウムを選択した。

青色発光デバイスへの挑戦

1989年3月、留学期間を満了し、日亜化学に戻った。会社に戻った中村のもとに、米国にいた時に先行発注しておいた、市販のMOCVD装置が納入された。大きさは縦横2X4m、奥行き1mの大きいもので、購入金額は2億円という高価な装置であった。反応装置の中には、一本の石英管が出ており、ここからトリメチルガリウムそのほかの原料混合ガスを吹き込み、加熱したサファイア基板の上に窒化ガリウム薄膜を析出させる、いわゆるワンプロー方式のMOCVD装置であった。約3ヶ月間、温度条件、ガス流量など、さまざまな製作条件で製膜をしたが、均一な薄膜は得られなかった。中村は従来の成膜方法そのものに問題があると考えた。これまでの成膜方法ではガリウム化合物、窒素ガスおよび関連原料ガスを基板表面に平行に、一方向から層流として供給する方法が論理的にあっていると考えられていた。しかし、この方法によって得られる窒化ガリウム薄膜は均一でなく、化学量論的に窒素が少なかった。中村は原料ガスの流し方について従来とは異なる様々な方法を考え、短期間にMOCVD装置の大改造とそれに対応した薄膜のデータを取る実験を何度もおこなった。この期間、装置の改造には、これまでの経験がものを言い殆ど自分で改造を行ったため、改造を外注試作すると1ヶ月以上かかるところを、一日二日で改造を終え、直ちに実験を始めることができ、条件の最適化というか、所望の薄膜を得るための必要な改造と、実験を短時間で、膨大な実験を行なうことができた。1990年の2月ころ、解決の糸口を見出し、同年夏になって、最終的に、ガリウム化合物を含む原料ガスを基板に水平に、そして窒素および水素ガスを基板に垂直な方向から送り込む方法が最適であるとの結論に達した。この期間は、まだこれといった成果が出ていなくて、ひたすら解決策を模索する状況であった。その中で会社の中での風当たりは強く、中村の開発を支援してくれる状況ではなかった。1990年の3月には、日亜の新社長は社外の専門家の勧めに応じ、中村に対して、青色LEDの開発を中止して、携帯電話用のHEMT(高速電子移動トランジスタ)用のガリウム砒素を製造することを命じている。しかし中村は今この開発を中止すれば、前社長の了解の下に、多額の開発費を受けていることに応えるため、および自らの決断を実現するため、解雇を覚悟で開発を続けた。その結果、これまでとは全く異なるのツーフロー方式と名づけた製膜法が開発された。この新しく開発した装置により、ようやくにして透明な窒化ガリウム薄膜を得ることに成功した。このツーフローMOCVDという装置はこれまでにない画期的な装置であり、特許出願をおこなったもので、後に404特許(特許第2628404号)といわれているものである。

1991年1月、これまでの条件を一部変更して製作した薄膜はこれまで得られていたものと

同じく、目視では透明で均一であった。その試料を電気的な特性を評価することのできるホール測定器に設置し、ホール移動度の測定をおこなったところ、200 という数字がでてきた。このホール移動度は薄膜の電子の流れやすさの目安となるもので、大きい値はより完全な結晶状態になっていることを示し、発光デバイスの実現には重要なものである。これまでの世界最高は名古屋大学の赤崎教授のグループの $90 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ であり、 $200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ は世界最高の値であった。このときは、さすがに中村は興奮し、歓喜して喜んだ。「自分の人生で世界最高とか、世界初めて、一番とかはなかったですから。」と後に述懐している。かくしてツーフロー MOCVD 装置の創出と窒化ガリウム製膜の成功というブレイクスルーの実現の瞬間であった。その時、中村には共同実験者などおらず、唯一人で得られた結果の大きさをじっくりと体感した。

窒化ガリウム発光デバイスにおけるもう一つの問題は、p型薄膜ができないという事であった。発光デバイスを作るためには、n型とp型の窒化ガリウム薄膜をつくる必要があるが、それがなかなかできなかった。1989年赤崎、天野らは窒化ガリウム薄膜に電子線を照射することにより p 型薄膜を得られることを発表していた。中村は当時、窒化ガリウムの開発を始めたばかりであったが、この報告にはかなりショックを受けた。「p 型窒化ガリウムは先にやられたなー」「自分でやってやろうと思っていたのに、先にやられたなー。こりゃあまいった。」と思っていた。中村はツーフロー MOCVD 装置が完成した時点で、この電子線照射による p 型化の方法は量産に適さないと考え、新たな方法を検討した。電子線を照射して p 型化ができたということは熱によるものではないかということは、電子線照射をおこなった赤崎、天野も考えて、窒化ガリウムにアクセプタ不純物であるマグネシウムを添加し、熱を使ったアニールの効果によって p 型化させる試みは既になされていたが、成功していなかった。ここで中村は改めてその問題を検討し、熱の効果を発揮させるには、その他の条件が重要であると考え、水素を含まない雰囲気中で熱処理することにより、添加したマグネシウムが活性化し、p 型となることを見出した。その理由として水素原子がアクセプタ不純物と結合しているというモデルを提案し p 型化の機構を解明した。この水素を含まない雰囲気中で熱処理した窒化ガリウム薄膜は固有抵抗が $5 \text{ } \Omega$ 以上小さく、 2 cm となり、ホール効果測定による正孔の移動度は $10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の良好な p 型層を得ることに 1992 年成功した。この方法は加熱処理を加えることで p 型化が容易にできることとなり、実用上大きい成果であった。

窒化ガリウム発光デバイスにおいてもう一つの問題は発光層となる高品質窒化インジウムガリウム単結晶膜が従来できていなかったことである。当時 NTT の松岡氏らが精力的に窒化インジウムガリウム単結晶膜の成長を発表していたが、室温ではバンド間発光による青色発光は観測されず、結晶欠陥による深い準位の黄色発光が主であった。このような窒化インジウムガリウム単結晶膜は青色発光ダイオードの発光層に使用できるようなものではなかった。

中村はツーフローMOCVD 装置を使用して窒化インジウムガリウム単結晶膜の成長条件を最適化することにより、室温でバンド間発光で強い青色発光を世界で初めて観測したのである。

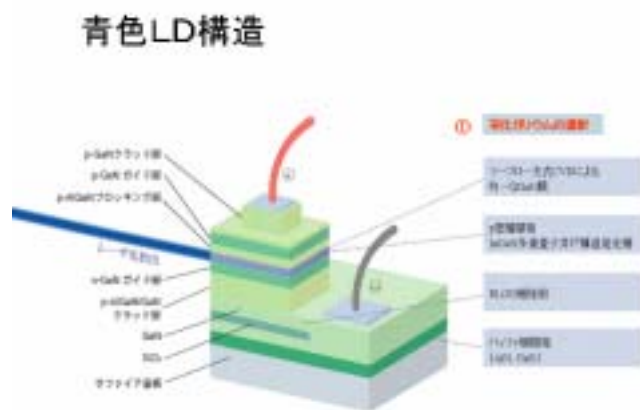
このように中村はツーフローMOCVD 装置を開発後、p型Ga₂Nの成長、高品質窒化インジウムガリウム単結晶膜の成長と短期間に数々の世界的ブレークスルーを達成することになるのである。

ツーフローMOCVD 装置の完成と均一高品質なp型窒化ガリウム薄膜と高品質窒化インジウムガリウム単結晶膜を得ることにより、青色は発光ダイオードを作り上げる要素技術がそろえた中村は以降次々と青色発光ダイオードの製作に成功することとなる。1991年pnホモ接合型で、発光効率0.18%、1992年ダブルヘテロ構造で、発光効率0.22%の青色発光ダイオードを製作した。そして1993年には窒化インジウムガリウムを発光層にしたダブルヘテロ構造で発光効率2.7%の青色発光ダイオードを製作した。これらの成果を基に、日亜化学工業は、1993年青色発光ダイオードを世界で初めて製品化した。この青色発光ダイオードは従来より100倍くらい明るいもので、発表にたいして信じがたいくらい明るく、実際にモノを見てびっくりしたという反響をよんだ。その後、発光層に窒化インジウムガリウム量子井戸構造を採用し、発光効率9.2%のさらに高輝度の青色発光ダイオードの開発に成功し、事業としても大きく成長し始めた。

中村は青色発光ダイオードの開発過程で、製作した薄膜の結晶内部の格子欠陥の多さと発光特性との関係について特別な関係に注目していた。青色発光ダイオードにおいては窒化ガリウムに少量のインジウムを添加した窒化インジウムガリウム三元系が利用されるが、この窒化インジウムガリウム三元系発光層についてであった。通常格子欠陥が 10^3 個/cm²以下にならなければ青色発光ダイオードの寿命は長続きしないと考えられていた。この窒化インジウムガリウム薄膜には約 10^{10} 個/cm²の多くの格子欠陥が存在したにもかかわらず寿命は10万時間以上劣化せずに安定に発光している。中村はその理由は次のように考えた。窒化ガリウムにインジウムを添加すると、インジウム原子の分布が一樣ではなく、極くわずかの組成変動を生じ、その結果として結晶内電子ポテンシャルが一樣でなく局在化する。そして電圧印加により注入された電子は、この局在化したポテンシャル近傍に止まることになり、格子欠陥に捕捉されることなく再結合して発光するからである。この様なポテンシャルの局在状態の存在はこれまでいかなる単結晶材料においても知られていないものであり、インジウム、ガリウム、窒素の三元系材料で初めて確認されたものである。

青色発光ダイオードの開発に成功した中村は次に青色半導体レーザの開発に取りかかった。1992年に米国の3M社がセレン化亜鉛を用い青色半導体レーザ発振というニュースがあったが、寿命が1秒以下であることが判明し、実用的な青色半導体レーザはまだできていな

かったのである。中村は、開発した窒化ガリウム青色発光ダイオードをベースに窒化インジウムガリウム多量子井戸構造および光閉じ込め層を作りこむことによって、窒化ガリウム青色半導体レーザを製作し、高出力パルス発振に成功して、その成果を日本応用物理学会論文誌1996年1月号に発表した。この論文は世界中の開発者の注目するところとなり、引用件数が、1997年で160件に達するという大きい反響をよんだ。

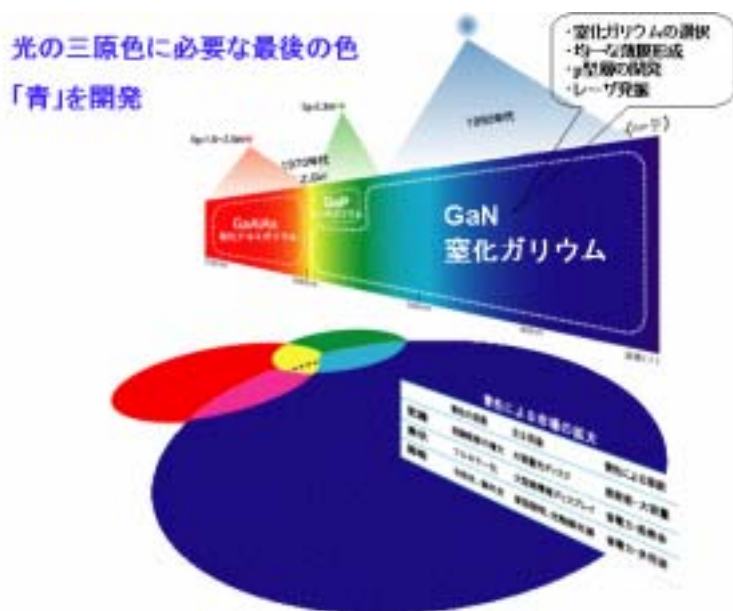


このレーザ発振成功のポイントは、発光層に20周期の窒化インジウムガリウムの多重量子井戸構造、および光ガイド層に窒化アルミニウムガリウムブロッキング層等を採用したことである。さらに中村はクラッド層にGaIn/AlGaIn超格子構造を採用して室温連続発振にも成功した。青色半導体レーザの場合は、発光ダイオードの場合に比べて、注入される電子の数が多いため、長寿命化を実現するには、格子欠陥をさらに減少させる必要があった。そこで中村はその対策として窒化ガリウム薄膜を基板に水平に成長させるELOG (Epitaxial Lateral Over Growth) 法という製法を採用して、1998年には欠陥を 10^{10} 個/cmから 10^7 個/cm²に大幅に減少させ、室温での290時間の連続発振に成功し、予測寿命が1万時間であると推定した。そして1999年日亜化学工業において、青色半導体レーザの製品化が世界で初めてなされた。

中村は以上の成果を論文にまとめ、1994年徳島大学より工学博士号を与られている。また社会的にも中村の業績は評価され始め、1995年桜井賞、1996年仁科記念賞、1996年大河内記念賞を受賞した。さらに1997年MRSメダル賞、2000年ホンダプライズ、2002年ベンジャミン・フランクリンメダル賞などを受賞している。そして赤崎とともに、1998年ジャック・モートン賞、1998年C & C賞、2000年朝日賞などを受賞し、赤崎、天野とともに2002年武田賞などを受賞している。

青色発光デバイスの利用価値の増大

中村が開発に成功した窒化ガリウム青色発光ダイオードと青色半導体レーザが揃うことにより、これまでに開発されている赤色と緑色とあわせて、半導体による光の三原色が揃うこととなり、様々な用途での利用が可能となった。



窒化ガリウム材料はインジウム添加量を変えることによって、紫外領域から、青、緑さらに黄色までの発光デバイス用材料としても使われるようになった。特に窒化ガリウムを用いた緑色発光ダイオードはこれまでの黄緑色リン化ガリウム発光ダイオードよりも、色が純粋な緑色で、かつ発光効率が高く、すでに実用化されている。

青色半導体レーザの開発により、次世代大容量光ディスク規格の一つである「Blu-ray Disc」が日韓欧 9 社によって 2002 年 2 月に発表された。これはデジタル放送やブロードバンドの普及により、大量のデジタルコンテンツが家庭、オフィスで利用されるが、12cm のディスクに従来より 5.7 倍の記録密度である 27 ギガバイトの記録が可能となり、デジタルハイビジョン映像が 2 時間、通常テレビ映像では 13 時間の記録が可能となる。更に上記規格のほかに、ディスクの両面利用あるいはディスクサイズの変更を含む技術の組み合わせにより、一枚のディスクで 5 ギガバイトあるいは 100 ギガバイトの記録が可能となり、複数のディスクを搭載することで 1 テラバイト以上の情報を記録、保存することが可能となる。また 3 色の半導体レーザを組み合わせた投影型大型ディスプレイ装置などの可能性が生まれた。

青色発光ダイオードの開発により、昼間でも鮮明な、大型フルカラーディスプレイが製品化され、市街地の屋外ディスプレイとして使われている。

また発光ダイオードの信号機への普及が始まっているが、これはいくつかの利点を有している。第一は視認性が良いこと、つまり、これまでの電球による信号表示では、西日があつ

た場合、反射光で赤と青のどちらが点灯しているか分らなくなることがあったが、西日が当たっても見えやすくなった。第二には電球の寿命は半年から 1 年であったが、8 年と長くなる。第三に消費電力が電球の 4 分の 1 になる。米国カリフォルニア州では 23 万機の歩行者用信号機が発光ダイオードに置き換わっている。日本国内では、平成 15 年 3 月末時点で、車両用信号機が 106 万機、歩行者用信号機が 81 万機、あわせて 187 万機が稼動しており、現在約 2.4 万機(車両用約 2.3 万機、歩行者用約 1 千機)が発光ダイオードに変更されており、信号機全体に占める割合は 1.3%である。経済産業省は発光ダイオードへの切り替えを促進するため、地方自治体に導入費用の半分を補助する方針を固め、平成 16 年度の概算要求として 28 億円を盛り込んでいる。全国の歩行者信号機を発光ダイオードに変更することにより、電力使用量が削減され、年間約 11 万トンの二酸化炭素の発生を抑制できることになる。

一般用照明として白色発光ダイオードが注目されている。白色発光ダイオードは青色発光ダイオードと黄色蛍光体を一体化したものと、青、緑、赤の 3 種の発光ダイオードを一体化したものの 2 種類があるが、いずれも青色発光ダイオードの開発により実現したものである。この白色発光ダイオードは数年後には発光効率が 50%となり、白熱電球の 5 倍、蛍光灯と同等の効率が実現される見通しである。白色発光ダイオードの寿命は白熱電球および蛍光灯の約 1 年に対し、8 年以上が確認されており、住宅用のみならず、あらゆる生活空間における照明として利用され、消費電力が少ないことによる電力消費の削減と長寿命化による廃棄物の減少が期待されている。

この白色発光ダイオードは現在、携帯電話および液晶テレビのバックライトとしての用途が拡大している。

白色発光ダイオード照明は、形状を平板、曲面、球等任意の形状とすることが可能であり、赤、緑、青三色のそれぞれの明るさを変えることができ、蛍光灯における昼白色から電球によるオレンジ色、さらには個人の好みに合わせて、色調が自由に換えられる理想の照明となり、人々への豊かな生活環境の実現に寄与する。

青色発光ダイオードおよび白色発光ダイオードをあわせて、2001 年に 900 億円、2006 年では 2300 億円の市場があるといわれている。また、白色発光ダイオードが白熱電球および蛍光灯に替わって生活空間照明に使われるようになれば、1 兆円を越える市場が期待できる。青色半導体レーザは次世代大容量光ディスクの普及と共に市場が増大し、数百億円以上の市場となると予想されている。中村が開発した窒化ガリウム青色発光デバイスは以上のように極めて広範な用途に用いられ始めている。

中村の窒化ガリウム発光デバイス開発過程の実践を見てきたが、リスクの大きい開発テーマをあえて選び、挑戦し、その推進に当たっては必ずやり抜くという強い精神力と、ひたむきに実験を継続する実行力とそして必要とあれば組織を越えて行動することの集大成として大

きい成果を得たもので、企業の中での実践ではあるが、その遂行はまさにアントレプレナーシップに満ちており、アントレプレナー列伝としてつらなる。

1999 年青色発光ダイオード、半導体レーザーの製品化ができ、開発が一段落したところで、日亜化学は窒化物半導体研究所を設立し、中村は初代所長に任命された。しかしそこにたずさわる所員は中村ひとりという状態で実効的な研究開発を新たに始めるという態勢ではなかった。そして中村は日亜化学での自分のなすべき仕事は終わったことを実感した。そして 1999 年 12 月 27 日、中村は辞職願いを提出し、20 年勤めた日亜化学を退社した。

第二のアントレプレナーへの旅立ち

転職にあたり、中村には米国の 10 の大学、5 の企業からオファーがあった。企業への転職は、研究の自由度がないため、大学を選択することとした。そして研究環境、家族を含めた居住環境などを考慮して、カリフォルニア大学サンタバーバラ校に決め、2000 年 2 月に着任した。

中村はカリフォルニア大学での研究生活を始めたが、研究では窒化ガリウムを中心とした素材の研究を始めている。狙いは蛍光灯に匹敵する高効率の白色発光ダイオードの開発、二つ目はバイオテロ対策として有用な紫外線センサの開発、三つ目は高出力・高周波電子デバイスなどである。この研究と平行して、JST ERATO(科学技術振興機構・創造科学技術推進事業)から、2001 年 10 月から 2006 年 9 月の 5 ヶ年計画の「中村不均一結晶プロジェクト」が発足し、総額 17 億円の研究開発費が認められ、総括リーダーとして中村がなり、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、東京理科大学そして筑波大学において研究が開始されている。この研究においては、中村が青色発光デバイスの開発に成功したときに、結晶に欠陥が多いにもかかわらず、なぜか良く光るという問題があった。中村らはこれは窒化ガリウムに少量のインジウムを混ぜると、インジウムが均一に分散せずに、部分的にインジウム濃度の高いところと低いところが微細量子構造として存在し、その結果欠陥濃度が多くても、良く光るのではないかと考えてきていたが、これを理論的に、実証的に確かめ、あわせてこれにマッチした新規素材を生み出す、不均一結晶工学ともいべき学問領域の創設と新規材料の創生を狙っている。

中村がもう一つ取り組んでいる問題が、日本企業で働いていた時代に出願した知的所有権における、特許権譲渡にたいする相当対価の請求である。ツーフローMOCVD 装置の考案に関する発明人中村の特許は、在籍した日亜化学に巨額の利益をもたらしたとの観点から、中村は職務発明として 200 億円の相当対価が与えられるべきであるとの訴えを起こした。2004 年 1 月 30 日東京地方裁判所で、支払われるべき対価は 604 億円に相当し、請求額の

200億円の支払を日亜化学は中村に支払う旨の判決がなされた¹。この中で、「小企業の貧弱な研究環境の下で、従業員発明者(中村)が個人的能力と独創的な発想により、競業会社をはじめとする世界中の研究機関に先んじて、産業界待望の世界的発明をなしとげたという、職務発明としては全く稀有な事例である。」と述べている。この問題は日亜化学が控訴し、東京高等裁判所で二審の裁判が行われていたが、2004年12月24日、中村と日亜化学工業の双方に和解に向けた話し合いを進めるように勧告し、双方が和解に同意した。佐藤久夫裁判長は「高額の特許料が認められた他の二つの訴訟で会社の貢献度が80%と95%であり、今回の職務発明の貢献度が大きいことを認めたいので、中村が日亜化学に在籍した間に発明したすべての職務発明の特許を受ける権利の譲渡に対する対価は、金額において先の例を大きく上回るものであり、中村の貢献度を5%と算定し、和解金として6億0857万円を基本として和解するように勧告した。その結果を受け、2005年1月11日、遅延損害金を含め8億4400万円を日亜化学が中村に支払うことで和解が成立した。

一審の判決結果に対比して、今回の二審の和解の内容があまりにもかけ離れていることから、2月初旬、筆者はそのことについて米国にいる中村に電話をしたところ、次のように話してくれた。

「今回の裁判の結果に関して、全然納得していない。和解せざるを得ないと弁護士に言われて、やむをえず受け入れたに過ぎない。この発明によって生じた日亜の普通の利益を差し引いた後の超過利益を少なめに見積もって2,000億円が見込まれ、それに貢献度を5%と認めたわけだから、それをかければ発明の特許料は100億円になる。然るに和解で示された発明の特許料は6億円である。このことは日本の司法制度に根本的なところに問題あるといわざるを得ない。

今回の訴訟に限らず、問題が生じたときに、お互いに相手の立場を認め、ウソは言わずに、お互いに自らの主張を論理的に説明し、フェアに、合理的に解決を見つけていくということが必要であるが、今の日本ではそれがまったくなされていない。このような状況では、日本は国際社会とフェアな付き合いが出来ず、取り残されてしまうであろう。

唯一の救いは、今回の裁判をきっかけに、発明報奨制度を変える企業が増え、発明の特許料は利益の3%とか、報奨金を上限無しとした企業もでてきており、そういう意味で、自分の提起した問題は、技術者や研究者の地位向上には役立ったかなと思っている。

今後は、日本の問題解決のあり方について、意見を述べていくつもりではあるが、それはそれとして、自分としてやりたい多くの新しい研究が山積しており、それに専念した

¹ H16. 1.30 東京地裁 知的財産権判決速報

<http://courtdomino2.courts.go.jp/chizai.nsf/c617a99bb925a29449256795007fb7d1/857cf473624ccc5e49256e2b002f2054?OpenDocument>

い。」

筆者は青色発光デバイスの開発経緯について、中村が多くの研究者が窒化ガリウムでは不可能であると思われた時代に、やり抜こうと決意し、開発の途中で会社幹部から、開発中止命令を受けながらも、その開発を継続したこと、そして例を見ない新しい方法で、これまでまったく得られなかった均一な高品質窒化ガリウム薄膜を世界で初めて製作することに成功したこと、そのことにより青色発光デバイスが一挙に製品化された事を確認している。このことから中村を抜きにして、青色発光デバイスが今日、誰もがそのすばらしさを享受できるとは到底考えられないことを思うとき、企業に雇用された社員の職務発明を超えたものであり、支払われるべき対価としては、今回の和解の額はあまりにも低いのではないかと感じざるを得ない。この中村の業績は真にアントレプレナーシップの発現そのものであって、企業内での職務発明の枠を超えているといわざるを得ない。

中村は現在カリフォルニア大学で研究と教育に従事する傍ら、米国クリー・ライティング社のコンサルタントとなり、大学での研究と関連して、新規商品開発に貢献することを目指しており、この延長上に、米国でしばしば見られる大学発の、新規事業の立ち上げという、真のアントレプレナーとなるスタートを切っている。

参考資料

財団法人 武田計測先端知財団 2002年プロシーディング

財団法人 武田計測先端知財団 2002年武田賞フォーラム

略歴

1977年 徳島大学工学部電子工学科卒業

1979年 徳島大学、修士課程卒業

1994年 徳島大学、工学博士取得

1979年～1999年 日亜化学工業株式会社

2000年～カリフォルニア大学サンタバーバラ校教授

受賞歴

1996年 仁科記念賞、米国 IEEE/LEOS エンジニアリングアチーブメント賞

1997年 MRS Medal Award、大河内記念賞

1998年 C&C 賞、英国ランク賞、IEEE Jack Morton Award

2000年 本田賞、Carl Zeiss Research Award

2001年 朝日賞、OSA Nick Holonyak, Jr. Award、IEEE Quantum Electronics Award

2002年 Benjamin Franklin Medal Award